

การหาสภาวะที่เหมาะสมของผลผลิตไบโอชาร์จากกากข้าวโพดหวานผ่านกระบวนการ
ไพโรไลซิสแบบช้าด้วยการวิเคราะห์พื้นผิวดตอบสนอง
Optimization of Biochar Yield from Sweet Corn Residue Through Slow
Pyrolysis Using Response Surface Methodology

นพดล ปันจันทร^{1,2}

¹ภาควิชาวิศวกรรมกระบวนการและอุตสาหกรรม สถาบันวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัย
เทคโนโลยีมหานคร 140 ถนนเชื่อมสัมพันธ์ แขวงกระทุ่มราย เขตหนองจอก กรุงเทพมหานคร 10530

²ศูนย์ความเชี่ยวชาญด้านวิศวกรรมที่ยั่งยืน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร 140 ถนนเชื่อมสัมพันธ์ แขวงกระทุ่มราย
เขตหนองจอก กรุงเทพมหานคร 10530

noppadol@mut.ac.th

Noppadol Panchan^{1,2}

¹Department of Process and Industrial Engineering, School of Engineering and Industrial Technology,
Mahanakorn University of Technology, 140 Chuem Samphan Rd., Krathum Rai, Nong Chok, Bangkok 10530

²Center of Excellence in Sustainable Engineering, Mahanakorn University of Technology, 140 Chuem
Samphan Rd., Krathum Rai, Nong Chok, Bangkok 10530

noppadol@mut.ac.th

วันที่รับบทความ 3 พฤษภาคม 2568

วันแก้ไขบทความ 8 พฤษภาคม 2568

วันตอบรับบทความ 25 มิถุนายน 2568

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการผลิตไบโอชาร์จากกากข้าวโพดหวานผ่านกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า การออกแบบการทดลองใช้เทคนิค Box-Behnken Design (BBD) เพื่อตรวจสอบผลกระทบของอุณหภูมิไพโรไลซิส (300-700 °C) อัตราการให้ความร้อน (2-20 °C/min) และระยะเวลาคงอุณหภูมิ (2-10 h) ต่อร้อยละผลผลิตของไบโอชาร์

จากการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีการวิเคราะห์พื้นผิวดตอบสนอง และพัฒนาเป็นแบบจำลองกำลังสอง พบว่าอุณหภูมิไพโรไลซิสมีผลกระทบเชิงลบอย่างมีนัยสำคัญต่อร้อยละผลได้ และมีปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยทั้งสามอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ทั้งนี้สภาวะที่เหมาะสมที่สุดคือการผลิตไบโอชาร์คือที่อุณหภูมิ 300 °C อัตราการให้ความร้อน 2 °C/min และระยะเวลาคงอุณหภูมิ 2 h ซึ่งให้ผลผลิตไบโอชาร์สูงสุดถึง 49.2% จากการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองด้วยการทดลองเพิ่มเติม 10 จุด แสดงให้เห็นถึงความแม่นยำสูงของแบบจำลองที่ได้ โดยมีค่าเฉลี่ยความแตกต่างสัมบูรณ์เพียง 1.97%

คำสำคัญ: ไบโอชาร์, ไพโรไลซิสแบบช้า, การออกแบบการทดลอง, วิธีการพื้นผิวดตอบสนอง, การหาสภาวะที่เหมาะสม

ABSTRACT

This research aimed to optimize the biochar production process from sweet corn residues through slow pyrolysis. The experimental design was based on the Box-Behnken Design (BBD) to evaluate the effects of pyrolysis temperature (300-700 °C), heating rate (2-20 °C/min), and holding time (2-10 h) on the biochar yield.

The experimental data were analyzed using Response Surface Methodology (RSM) to develop a quadratic model. The results indicated that pyrolysis temperature had a significantly negative impact on % Yield, and significant interactions among the three factors were also observed. Numerical optimization revealed that the highest predicted yield of 49.2% could be achieved at 300 °C, 2 °C/min heating rate, and 2 h holding time. The model's reliability was confirmed by additional randomized experiments, with an average absolute deviation of only 1.97%.

KEYWORDS: Biochar, Slow Pyrolysis, Experimental Design, Response Surface Methodology, Optimization

1. บทนำ

การแปรรูปผลิตภัณฑ์จากข้าวโพดให้เป็นน้ำมันข้าวโพดได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในประเทศไทย เนื่องจากเป็นเครื่องดื่มที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูง อุดมไปด้วยวิตามินและแร่ธาตุที่มีประโยชน์ต่อสุขภาพ เช่น วิตามินเอ วิตามินบี แคลเซียม และฟอสฟอรัส อีกทั้งยังสามารถบริโภคได้ทุกช่วงวัย ทำให้มีการขยายตัวของอุตสาหกรรมผลิตน้ำมันข้าวโพดอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะในภาคอุตสาหกรรมขนาดกลางและขนาดใหญ่ (รุ่งทิพาและวิชาญ, 2563) อย่างไรก็ตาม กระบวนการผลิตดังกล่าวส่งผลให้เกิดของเสียในปริมาณมาก ซึ่งหากไม่มีการจัดการอย่างเหมาะสมอาจก่อให้เกิดปัญหาที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่ร้ายแรงตามมา (Nguyen et al., 2024) ทั้งนี้ของเสียจากกระบวนการผลิตน้ำมันข้าวโพดแบ่งออกเป็นสองส่วนหลัก ได้แก่ เปลือกและขังข้าวโพด ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในหลายด้าน เช่น การนำไปเป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตเชื้อเพลิงชีวมวล เนื่องจากมีค่าความร้อนสูงและสามารถใช้เป็นพลังงานทดแทนในโรงงานอุตสาหกรรม (กิตติการ และคณะ, 2558) รวมถึงการนำไปผลิตเป็นวัสดุชีวภาพสำหรับการผลิตพลาสติกชีวภาพและวัสดุก่อสร้าง (วิโรจน์ และคณะ, 2564; Nurhayati et al., 2025) ส่วนที่สองคือกากข้าวโพด ซึ่งเป็นของเสียที่เหลือจากการคั้นน้ำซึ่งมีคุณค่าทางโภชนาการต่ำ โดยทั่วไปมักนำไปใช้เป็นอาหารสัตว์ในราคาถูก (Jiao et al., 2022) ทั้งนี้กากข้าวโพดมีปัญหาการเน่าเสียที่รวดเร็ว หากไม่ได้รับการจัดการอย่างเร่งด่วน จะก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมโดยตรง เช่น การปล่อยก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการย่อยสลายกากข้าวโพดด้วยจุลินทรีย์ ซึ่งเป็นก๊าซเรือนกระจกที่มีผลกระทบต่อภาวะโลกร้อนและคุณภาพอากาศโดยรวม อีกทั้งยังเป็นแหล่งที่ก่อให้เกิดเชื้อโรคได้ (University of Nebraska-Lincoln, 2018) ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งในการจัดการของเสียประเภทนี้ให้มีประสิทธิภาพ

แนวทางหนึ่งที่สามารถนำกากข้าวโพดไปใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุดคือ การนำกากข้าวโพดมาผลิตเป็นไบโอชาร์ (biochar) ซึ่งเป็นวัสดุคาร์บอนที่มีคุณสมบัติเด่นคือมีรูพรุนและพื้นที่ผิวสูง (Lehmann et al., 2016) มีความสามารถในการกักเก็บน้ำและธาตุอาหารในดิน ช่วยเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ของดิน และลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้ (Yadav et al., 2023) โดยทั่วไปกระบวนการผลิตไบโอชาร์จากชีวมวลสามารถดำเนินการได้ผ่านกระบวนการไพโรไลซิส (pyrolysis) จัดเป็นกระบวนการให้ความร้อนกับชีวมวลในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจนจำกัด ทำให้เกิดการย่อยสลายเชิงความร้อนและแปรสภาพเป็นไบโอชาร์ (Ahmad et al., 2014) กระบวนการนี้สามารถดำเนินการภายใต้อุณหภูมิที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของไบโอชาร์ที่ต้องการ อุณหภูมิในกระบวนการไพโรไลซิสมักอยู่ในช่วง 300-800°C โดยอุณหภูมิที่สูงขึ้นมักส่งผลให้เกิดรูพรุนใน

โครงสร้างของไบโอชาร์มากขึ้น ส่งผลดีต่อการกักเก็บน้ำและธาตุอาหารในดิน ทั้งนี้อุณหภูมิที่แตกต่างกันจะให้ไบโอชาร์ที่มีคุณสมบัติต่างกัน เช่น ความสามารถในการดูดซับ ความเสถียรของโครงสร้าง และปริมาณคาร์บอนคงเหลือ ดังนั้นการควบคุมสภาวะการผลิตที่เหมาะสมจึงเป็นปัจจัยสำคัญในการผลิตไบโอชาร์ที่มีคุณภาพสูง (Qambrani et al., 2017)

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและหาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการผลิตไบโอชาร์จากกากข้าวโพดหวานผ่านกระบวนการไพโรไลซิส โดยมุ่งเน้นการวิเคราะห์ผลของอุณหภูมิ อัตราการให้ความร้อน และระยะเวลาคงอุณหภูมิในกระบวนการไพโรไลซิสต่อร้อยละผลผลิตของไบโอชาร์ ด้วยการออกแบบการทดลองและการวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนอง เพื่อพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สามารถทำนายผลผลิตได้อย่างแม่นยำ ผลลัพธ์จากการศึกษานี้จะเป็นประโยชน์ต่อการจัดการของเสียจากการผลิตน้ำนมข้าวโพดและสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในระดับชุมชนหรืออุตสาหกรรมขนาดย่อมได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของการผลิตไบโอชาร์จากกากข้าวโพดหวานผ่านกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า โดยปรับเปลี่ยนอุณหภูมิไพโรไลซิส อัตราการให้ความร้อน และระยะเวลาในการคงอุณหภูมิ เพื่อให้ได้ร้อยละผลได้ไบโอชาร์สูงสุด รวมถึงการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สามารถทำนายผลได้ของไบโอชาร์ได้อย่างแม่นยำ

3. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

3.1. กระบวนการไพโรไลซิส

การไพโรไลซิส (Pyrolysis) หมายถึงกระบวนการสลายตัวของวัสดุชีวมวลโดยอาศัยความร้อนในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจนหรือมีออกซิเจนเพียงเล็กน้อย ซึ่งกระบวนการนี้สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทหลัก ดังรายละเอียดต่อไปนี้

3.1.1. ไพโรไลซิสแบบช้า (Slow Pyrolysis)

ไพโรไลซิสแบบช้า (Slow Pyrolysis) เป็นกระบวนการที่ใช้เวลาในการย่อยสลายชีวมวลนานกว่ากระบวนการไพโรไลซิสประเภทอื่น โดยทั่วไปใช้เวลาในการคงอุณหภูมิหลายนาทิจึงหลายชั่วโมง ดำเนินการที่อุณหภูมิระหว่าง 300-700 °C และอัตราการให้ความร้อนต่ำประมาณ 0.1-10 °C/min กระบวนการนี้มักถูกออกแบบมาเพื่อเพิ่มผลผลิตของแข็งหรือที่เรียกว่าไบโอชาร์ ซึ่งมีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก และสามารถนำไปใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดิน การดูดซับมลพิษ และการกักเก็บคาร์บอนในระยะยาว (Qambrani et al., 2017)

3.1.2. ไพโรไลซิสแบบเร็ว (Fast Pyrolysis)

ไพโรไลซิสแบบเร็ว (Fast Pyrolysis) เป็นกระบวนการที่ออกแบบมาเพื่อเพิ่มผลผลิตของน้ำมันชีวภาพซึ่งเป็นเชื้อเพลิงที่ทดแทนได้ กระบวนการนี้ดำเนินการที่อุณหภูมิประมาณ 400-600°C และมีอัตราการให้ความร้อนสูงกว่าไพโรไลซิสแบบช้า โดยอยู่ในช่วง 10-200 °C/min และมีเวลาในการเกิดไพโรไลซิสที่สั้น กระบวนการนี้เหมาะสำหรับชีวมวลที่มีโครงสร้างเซลลูโลสสูง และเป็นที่ยอมรับการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพ (Adelawon et al., 2021)

3.1.1. ไพโรไลซิสแบบวาบ (Flash Pyrolysis)

ไพโรไลซิสแบบวาบ (Flash Pyrolysis) เป็นกระบวนการที่มีอัตราการให้ความร้อนสูงมาก (1000 °C/min) ที่อุณหภูมิระหว่าง 450-1000 °C และเวลาในการเกิดไพโรไลซิสสั้นมาก ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์หลักเป็นก๊าซสังเคราะห์ (syngas) ในปริมาณสูง และมีน้ำมันชีวภาพเป็นผลพลอยได้ กระบวนการนี้เหมาะสำหรับการผลิตพลังงานความร้อนและไฟฟ้า เนื่องจากสามารถนำก๊าซสังเคราะห์ที่ได้ไปเผาไหม้โดยตรง หรือใช้ในกระบวนการแปลงก๊าซเป็นของเหลว (Gas-to-Liquid, GTL) เพื่อผลิตเชื้อเพลิงที่มีค่าพลังงานสูง อย่างไรก็ตาม ไพโรไลซิสแบบวาบต้องการอุปกรณ์ที่ทนต่ออุณหภูมิสูงและควบคุมกระบวนการ

ที่รวดเร็ว ทำให้มีความซับซ้อนมากกว่ากระบวนการไพโรไลซิสประเภทอื่น (Adelawon et al., 2021)

จากการเปรียบเทียบกระบวนการไพโรไลซิสตารางที่ 1 พบว่ากระบวนการไพโรไลซิสแบบช้ามีลักษณะเฉพาะตัวที่แตกต่างจากกระบวนการอื่น ผลิตภัณฑ์หลักที่ได้มีสัดส่วนของไบโอชาร์สูงกว่าผลิตภัณฑ์ประเภทอื่น ตรงกันข้ามกับไพโรไลซิสแบบเร็วที่มุ่งเน้นการเพิ่มผลผลิตของน้ำมันชีวภาพ (Al Arni, 2018) อย่างไรก็ตาม สัดส่วนของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากไพโรไลซิสแบบช้าขึ้นอยู่กับลักษณะของชีวมวลและสถานะของกระบวนการอย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะองค์ประกอบของวัสดุชีวมวลซึ่งประกอบด้วยเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน การสลายตัวขององค์ประกอบเหล่านี้ภายใต้อัตราการให้ความร้อนที่ช้าเอื้อให้เกิดปฏิกิริยาทุติยภูมิ นำไปสู่การเพิ่มปริมาณการก่อดำของถ่าน (Char) จากลักษณะเฉพาะดังกล่าว กระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าจึงมีความเหมาะสมอย่างยิ่งต่อการผลิตไบโอชาร์ที่มีสัดส่วนผลผลิตสูง นอกจากนี้ การใช้ไพโรไลซิสแบบช้ายังมีข้อดีด้านความเหมาะสมกับการดำเนินการในระดับชุมชน เนื่องจากสามารถใช้เครื่องปฏิกรณ์ที่มีโครงสร้างทางวิศวกรรมไม่ซับซ้อนเมื่อเทียบกับระบบไพโรไลซิสแบบอื่นๆ (Qambrani et al., 2017; Lataf et al., 2022)

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบกระบวนการไพโรไลซิสต่างๆ

คุณสมบัติ	ไพโรไลซิสแบบช้า	ไพโรไลซิสแบบเร็ว	ไพโรไลซิสแบบแฟลช
อุณหภูมิ (°C)	300-700	400-600	450-1000
อัตราการให้ความร้อน (°C/min)	0.1-10	10-200	>1000
เวลาในการคงอุณหภูมิ	หลายนาที่ถึงหลายชั่วโมง	0.5-2 วินาที	<1 วินาที
ผลิตภัณฑ์หลัก	ไบโอชาร์	น้ำมันชีวภาพ	ก๊าซสังเคราะห์
ปริมาณไบโอชาร์ (%)	สูง (มากกว่า 30%)	ต่ำ (10-20%)	ต่ำมาก (<10%)
ปริมาณน้ำมันชีวภาพ (%)	ต่ำ (10-20%)	สูง (มากกว่า 60%)	ปานกลาง (20-40%)
ปริมาณก๊าซสังเคราะห์ (%)	ปานกลาง (20-30%)	ปานกลาง (20-30%)	สูง (>50%)
ลักษณะเด่น	ผลิตไบโอชาร์คุณภาพสูง	ผลิตน้ำมันชีวภาพได้ในปริมาณสูง	ผลิตก๊าซสังเคราะห์ได้ในปริมาณสูง
การนำไปใช้ประโยชน์	ปรับปรุงดิน และกักเก็บคาร์บอน	ผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพ	ผลิตพลังงานและเชื้อเพลิงสังเคราะห์
ความซับซ้อนของกระบวนการ	ต่ำ	ปานกลาง	สูง
อ้างอิง	Qambrani et al., 2017	Adelawon et al., 2021	Adelawon et al., 2021

3.2. ปัจจัยที่มีผลต่อผลผลิตไบโอชาร์ในกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า

ปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลต่อผลผลิตไบโอชาร์จากกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าคืออุณหภูมิของกระบวนการ โดยทั่วไปพบว่าเมื่ออุณหภูมิไพโรไลซิสเพิ่มสูงขึ้น ผลผลิตไบโอชาร์จะลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้พบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อกระบวนการไพโรไลซิสเพื่อให้ได้ผลผลิตเป็นไบโอชาร์ในปริมาณสูงจะอยู่ในช่วง 300-500 องศาเซลเซียส อย่างไรก็ตาม แม้ว่าอุณหภูมิที่สูงกว่า 500 องศาเซลเซียสจะให้ผลผลิตไบโอชาร์ในสัดส่วนที่ต่ำลง แต่พบว่าที่อุณหภูมิสูงสามารถช่วยเพิ่ม

คุณสมบัติสำคัญอื่น ๆ ของไบโอชาร์ เช่น ปริมาณคาร์บอน ความพรุน และเสถียรภาพทางเคมีให้ดีขึ้น (Lataf et al., 2022) อัตราการให้ความร้อนเป็นปัจจัยที่มีบทบาทสำคัญ โดยทั่วไปพบว่าอัตราการให้ความร้อนที่ช้า (น้อยกว่า 20 °C/min) มีแนวโน้มให้ผลผลิตไบโอชาร์สูงกว่าการให้ความร้อนอย่างรวดเร็ว อีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลกระทบคือระยะเวลาในการคงอุณหภูมิ (Holding Time) ในระหว่างกระบวนการไพโรไลซิส จากงานวิจัยก่อนหน้านี้พบว่าการใช้เวลานานขึ้นมีส่วนช่วยเพิ่มความสมบูรณ์ของการระเหยของสารอินทรีย์และการก่อกำเนิดของคาร์บอนในไบโอชาร์ แต่อาจนำไปสู่การลดลงของผลผลิตเล็กน้อยและการให้เวลาในการไพโรไลซิสที่ยาวนานก่อให้เกิดต้นทุนด้านพลังงานที่สูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ (Adelawon et al., 2021)

3.3. ทฤษฎีวิธีการพื้นผิวตอบสนอง Response Surface Methodology (RSM)

วิธีการพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology; RSM) เป็นเทคนิคที่ใช้ในการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างหลายตัวแปรที่สามารถควบคุมได้ (Factors) กับการตอบสนอง (Response) ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหรือระบบ ซึ่ง RSM นิยมใช้เพื่อศึกษาและวิเคราะห์การตอบสนองที่ได้รับจากการปรับเปลี่ยนหลายปัจจัยหรือตัวแปร เพื่อหาค่าผลลัพธ์ที่ดีที่สุด โดย RSM มีขั้นตอนดังนี้ (Montgomery, 2017)

3.3.1. **การเลือกปัจจัยและระดับ** เป็นการเลือกปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการตอบสนอง เช่น ความดัน อุณหภูมิ เวลา และปริมาณส่วนผสมต่างๆ จากนั้นจะต้องกำหนดระดับของปัจจัยแต่ละตัว (เช่น สูง กลาง ต่ำ) ที่ใช้ในการทดลอง

3.3.2. **การออกแบบการทดลอง** เป็นการเลือกการออกแบบการทดลอง เช่น การออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง การออกแบบการทดลองแบบบล็อกซ์-เบนเคน การออกแบบการทดลองแบบแฟกเตอร์-เบอร์แมน ซึ่งวิธีเหล่านี้จะช่วยลดจำนวนการทดลองในขณะที่ยังคงสามารถให้ข้อมูลที่เพียงพอในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยได้

3.3.3. **การสร้างแบบจำลองการถดถอย (Regression Modeling)** เป็นการคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยหรือตัวแปรควบคุมกับการตอบสนอง โดยปกติแบบจำลองจะมีลักษณะเป็นสมการพหุนามที่เชื่อมโยงค่าของปัจจัยและการตอบสนอง ตัวอย่างของสมการพหุนามกำลังสอง ดังสมการ (Montgomery, 2017)

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_1^2 + \beta_5 X_2^2 + \beta_6 X_3^2 + \beta_7 X_1 X_2 + \beta_8 X_1 X_3 + \beta_9 X_2 X_3 + \varepsilon \quad (1)$$

เมื่อ Y คือการตอบสนอง โดยที่ X_1 X_2 และ X_3 คือปัจจัยหรือตัวแปรต้นต่างๆ ในการทดลอง β คือค่าสัมประสิทธิ์ และ ε คือค่าความคลาดเคลื่อน

3.3.4. **การวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนอง (Response Surface)** เป็นแสดงการตอบสนองในรูปของกราฟสามมิติ และแผนที่คอนทัวร์ (Contour Plot) ช่วยให้เราสามารถมองเห็นได้ว่าค่าของปัจจัยใดที่ทำให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด และหาจุดที่เหมาะสมของปัจจัยที่จะให้ผลลัพธ์สูงสุด (หรือต่ำสุด) ในการตอบสนอง

3.3.5. **การหาค่าที่ดีที่สุด (Optimization)** เป็นการนำผลลัพธ์จากการสร้างแบบจำลองและการวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนอง เพื่อทำการหาค่าของปัจจัยที่ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด เมื่อได้ค่าปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดแล้ว จะนำแบบจำลองนั้นมาทดสอบกับการทดลองจริงเพื่อดูว่าได้ผลลัพธ์ที่ได้เป็นไปตามที่แบบจำลองทำนายไว้หรือไม่

4. วิธีดำเนินการวิจัย

4.1. การเตรียมวัตถุดิบ

วัตถุดิบที่ใช้ในการทดลองคือกากข้าวโพดหวาน ที่เหลือทิ้งจากการคั้นน้ำนมข้าวโพดแล้ว นำไปอบแห้งในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส จนกระทั่งได้ความชื้นต่ำกว่า 5% เพื่อป้องกันการเน่าเสีย จากนั้นนำกากข้าวโพดหวาน

แห้งมาบดให้ได้ขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 1–5 มิลลิเมตร เพื่อควบคุมให้มีขนาดที่สม่ำเสมอในทุกการทดลองและมีประสิทธิภาพในการเกิดไฟโรไลซิสมากยิ่งขึ้น

4.2. การออกแบบการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ

การทดลองนี้ได้ออกแบบโดยใช้เทคนิค Box-Behnken Design (BBD) โดยกำหนดให้มีตัวแปรต้นสามปัจจัย และแบ่งเป็นระดับสูง กลาง และต่ำ ดังแสดงในตารางที่ 2 ซึ่งการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติจะใช้โปรแกรม R (version 4.5.0)

ตารางที่ 2 แสดงตัวแปรต้นและระดับของแต่ละตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบการทดลอง

ตัวแปรต้น	ระดับ		
	ต่ำ (-1)	กลาง (0)	สูง (+1)
X ₁ : อุณหภูมิไฟโรไลซิส (°C)	300	500	700
X ₂ : อัตราการให้ความร้อน (°C/min)	2	11	20
X ₃ : ระยะเวลาคองอุณหภูมิ (h)	2	6	10

4.3. การเตรียมไบโอชาร์ด้วยกระบวนการไฟโรไลซิส

การทดลองดำเนินการโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์ไฟโรไลซิสแบบเบดนิ่ง (Fixed-bed Reactor) ซึ่งเป็นท่อสแตนเลสและติดตั้งภายในเตาเผาไฟฟ้าที่สามารถตั้งโปรแกรมควบคุมอุณหภูมิและอัตราการให้ความร้อนได้ สำหรับกระบวนการดำเนินการในแต่ละการทดลอง เริ่มจากบรรจุกากข้าวโพดหวานที่ผ่านการอบแห้งและบดแล้วการทดลองละ 100 g ลงในท่อปฏิกรณ์และติดตั้งท่อปฏิกรณ์เข้ากับชุดเตาไฟโรไลซิส จากนั้นป้อนก๊าซไนโตรเจนที่อัตรา 1 L/min เพื่อสร้างสภาวะปราศจากออกซิเจนในระบบ ทำการตั้งค่าการให้ความร้อนของเครื่องปฏิกรณ์ตามที่กำหนด เมื่อความร้อนของระบบถึงอุณหภูมิเป้าหมาย ทำการคองอุณหภูมิไว้เป็นระยะเวลาที่กำหนด เมื่อสิ้นสุดการทดลองทำการลดอุณหภูมิสู่อุณหภูมิห้องภายใต้การไหลของก๊าซไนโตรเจน จากนั้นเก็บรวบรวมไบโอชาร์ที่ได้เพื่อนำไปชั่งน้ำหนักและคำนวณหาผลได้ของไบโอชาร์ดังสมการที่ 2 (Adelawon et al., 2021)

$$\text{ผลได้ไบโอชาร์ (\%)} = \left(\frac{\text{มวลของไบโอชาร์ที่ผลิตได้}}{\text{มวลของชีวมวลหรือกากข้าวโพดแห้งเริ่มต้น}} \right) \times 100 \quad (2)$$

5. ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

การศึกษากระบวนการไฟโรไลซิสของกากข้าวโพดหวานที่มีตัวแปรต้น 3 ตัว ได้แก่ อุณหภูมิ อัตราการให้ความร้อน และเวลาในการคองอุณหภูมิ เพื่อหาร้อยละผลได้ของไบโอชาร์ (%Yield) โดยออกแบบการทดลองแบบ BBD ได้จำนวน 17 การทดลอง ซึ่งผลการทดลองแสดงไว้ในตารางที่ 3 พบว่าผลได้ของไบโอชาร์อยู่ในช่วง 25.1–48.5% การวิเคราะห์ผลการทดลองเพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่าง ๆ ที่ต้องการศึกษาเกี่ยวกับค่าตอบสนองในรูปของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สามารถวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองการถดถอยแบบกำลังสองน้อยที่สุด (Least Square Regression Model) ที่ระดับนัยสำคัญ 95% พบว่าแบบจำลองพหุนามกำลังสอง (Quadratic Model) มีความเหมาะสมที่สุดที่จะนำมาใช้ในการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่าง ๆ และสามารถนำมาสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ดังแสดงในสมการที่ 3

$$Y (\%) = 38.44 - 9.55X_1 + 0.88X_2 - 2.10X_3 + 2.41X_1X_2 + 1.68X_1X_3 + 1.29X_2X_3 - 3.07X_1^2 - 1.22X_2^2 - 1.87X_3^2 \quad (3)$$

โดยที่ X₁ X₂ และ X₃ คือ อุณหภูมิไฟโรไลซิส อัตราการให้ความร้อน และระยะเวลาคองอุณหภูมิ ตามลำดับ

การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) เพื่อตรวจสอบความเหมาะสมและประสิทธิภาพของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้น โดยผลการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 4 พบว่าตัวแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Model) มีนัยสำคัญทางสถิติสูง

($p < 0.05$) และการขาดความพอดี (Lack of Fit) ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองนี้มีความเหมาะสมในการอธิบายความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ และสามารถทำนายผลการตอบสนองได้แม่นยำในระดับสูง โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.9910 ขณะที่ค่า Adjusted R^2 เท่ากับ 0.9793 แสดงว่าแบบจำลองยังคงรักษาความแม่นยำได้แม้มีการปรับค่าตามจำนวนพารามิเตอร์ที่ใช้ ส่วนค่า Predicted R^2 ที่ได้เท่ากับ 0.9285 บ่งชี้ว่าแบบจำลองมีความสามารถในการทำนายข้อมูลใหม่ได้ดี (Montgomery, 2017)

ตารางที่ 3 เมทริกซ์การออกแบบ Box-Behnken และผลได้ของไบโอชาร์

การทดลอง ที่	ตัวแปรต้น			ผลได้ของไบโอชาร์ (%)
	X ₁ : อุณหภูมิ (°C)	X ₂ : อัตราการให้ความร้อน (°C/นาท)	X ₃ : เวลาในการคงอุณหภูมิ (ชั่วโมง)	
1	300 (-1)	2 (-1)	6 (0)	48.5
2	700 (+1)	2 (-1)	6 (0)	25.1
3	300 (-1)	20 (+1)	6 (0)	45.2
4	700 (+1)	20 (+1)	6 (0)	28.8
5	300 (-1)	11 (0)	2 (-1)	47.1
6	700 (+1)	11 (0)	2 (-1)	29.5
7	300 (-1)	11 (0)	10 (+1)	42.6
8	700 (+1)	11 (0)	10 (+1)	26.3
9	500 (0)	2 (-1)	2 (-1)	39.8
10	500 (0)	20 (+1)	2 (-1)	41.5
11	500 (0)	2 (-1)	10 (+1)	35.4
12	500 (0)	20 (+1)	10 (+1)	33.9
13	500 (0)	11 (0)	6 (0)	38.2
14	500 (0)	11 (0)	6 (0)	38.8
15	500 (0)	11 (0)	6 (0)	38.5
16	500 (0)	11 (0)	6 (0)	38.0
17	500 (0)	11 (0)	6 (0)	38.6

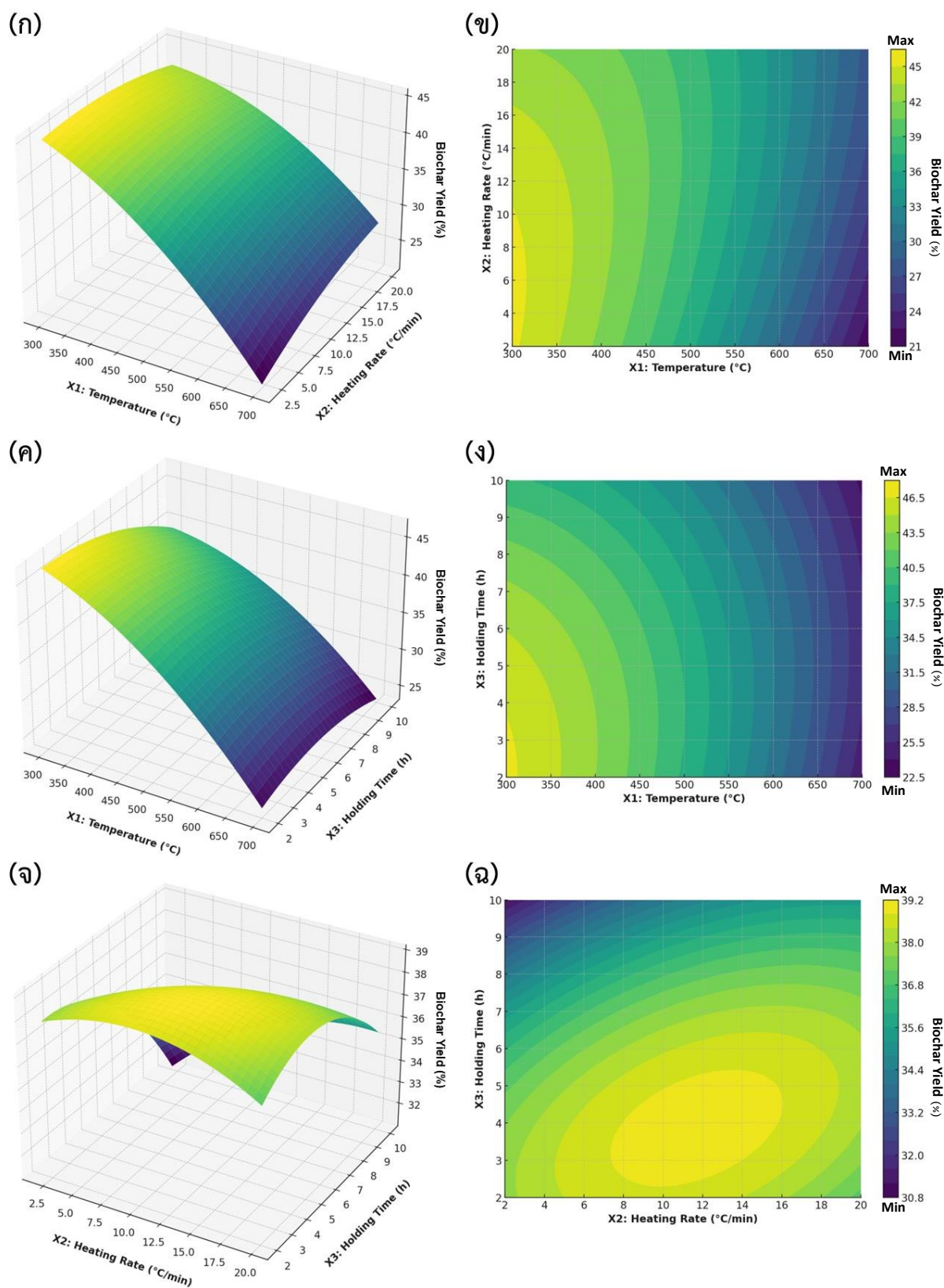
เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในสมการที่ 3 ซึ่งแสดงอิทธิพลของตัวแปรต้นต่อตัวแปรตามหรือผลการตอบสนอง (ร้อยละผลได้ของไบโอชาร์) โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์ที่เป็นบวกแสดงถึงเมื่อค่าของตัวแปรต้นเพิ่มขึ้น ผลตอบสนองจะมีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์เป็นลบแสดงถึงเมื่อค่าของตัวแปรต้นเพิ่มขึ้นผลตอบสนองจะลดลง โดยเมื่อพิจารณาร่วมกับการวิเคราะห์ ANOVA จะพบว่าทุกพจน์ของแบบจำลองที่สร้างขึ้นนั้นมีนัยสำคัญทางสถิติทั้งหมด โดยเฉพาะอย่างยิ่งพจน์ของตัวแปรที่มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญที่สุดต่อร้อยละผลได้ของไบโอชาร์คือ อุณหภูมิไพโรไลซิส ซึ่งอุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้ผลผลิตลดลงอย่างชัดเจน ทั้งในเชิงเส้นและเชิงกำลังสอง ในขณะที่อัตราการให้ความร้อนและระยะเวลาไพโรไลซิสมีผลกระทบรองลงมา โดยแสดงผลกระทบทั้งในรูปแบบเชิงเส้น เชิงกำลังสอง และปฏิสัมพันธ์ระหว่างกัน

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์ ANOVA สำหรับแบบจำลองกำลังสองของ %Yield ไบโอชาร์

แหล่งความแปรปรวน	Sum of Squares	df	Mean Square	F-Value	P-Value	นัยสำคัญ
แบบจำลอง (Model)	685.15	9	76.13	85.14	<0.0001	***
X ₁ -อุณหภูมิไพโรไลซิส (°C)	512.11	1	512.11	572.73	<0.0001	***
X ₂ -อัตราการให้ความร้อน (°C/นาท)	4.36	1	4.36	4.87	0.0415	*
X ₃ -เวลาในการคงอุณหภูมิ (ชั่วโมง)	24.64	1	24.64	27.56	0.0008	***
X ₁ ²	37.65	1	37.65	42.11	0.0002	***
X ₂ ²	8.41	1	8.41	9.40	0.0181	*
X ₃ ²	19.78	1	19.78	22.12	0.0017	**
X ₁ X ₂	18.49	1	18.49	20.68	0.0022	**
X ₁ X ₃	9.00	1	9.00	10.07	0.0157	*
X ₂ X ₃	5.06	1	5.06	5.66	0.0478	*
คลาดเคลื่อนตกค้าง (Residual)	6.26	7	0.89	-	-	-
การขาดความพอดี (Lack of Fit)	1.89	3	0.63	4.50	0.0591	-
ความคลาดเคลื่อนบริสุทธิ์ (Pure Error)	0.58	4	0.14	-	-	-
ผลรวม (Total)	691.41	16	-	-	-	-

หมายเหตุ ระดับของความมีนัยสำคัญ * ** และ *** หมายถึงมีนัยสำคัญน้อย ปานกลาง และสูง ตามลำดับ

การศึกษาปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้นที่ส่งผลกระทบต่อร้อยละผลได้ของไบโอชาร์ โดยวิเคราะห์จากกราฟพื้นผิวตอบสนองและแผนที่คอนทัวร์ดังแสดงในรูปที่ 1 จากกราฟพื้นผิวตอบสนอง (รูปที่ 1ก) แสดงให้เห็นว่า อุณหภูมิไพโรไลซิสมิอิทธิพลอย่างชัดเจนต่อการลดลงของ %Yield เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น โดยเฉพาะในช่วง 500–700 °C ซึ่งเป็นผลจากการสลายตัวขององค์ประกอบลิกโนเซลลูโลสและการปลดปล่อยสารระเหยอย่างรวดเร็ว (Lataf et al., 2022) ในขณะที่อัตราการให้ความร้อนมีผลกระทบในระดับปานกลาง โดยพบว่าในช่วง 2–10 °C/min จะได้ %Yield สูงกว่า แผนที่คอนทัวร์ (รูปที่ 1ข) แสดงเส้นโค้งที่ไม่ขนานกัน ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่าในบริเวณอุณหภูมิต่ำและอัตราการให้ความร้อนต่ำจะให้ %Yield สูงที่สุด (ประมาณ 48–49%) สำหรับปฏิสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาในการคงอุณหภูมิ กราฟพื้นผิวตอบสนอง (รูปที่ 1ค) แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมียังคงเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลให้ผลผลิตลดลงอย่างต่อเนื่อง ในขณะที่ระยะเวลาการคงอุณหภูมิมิผลกระทบรองลงมา ซึ่งพบว่าระยะเวลาที่สั้นกว่าจะให้ %Yield สูงกว่า ในช่วงอุณหภูมิต่ำจนถึงปานกลาง อย่างไรก็ตาม ที่อุณหภูมิสูงผลของระยะเวลาเริ่มลดลงหรือไม่ชัดเจน แผนที่คอนทัวร์ (รูปที่ 1ง) แสดงรูปแบบโค้งที่เป๋ไปทางช่วงอุณหภูมิต่ำถึงเวลาสั้น ซึ่งยืนยันตำแหน่งของสภาวะที่เหมาะสม อย่างไรก็ตาม ผลกระทบของอัตราการให้ความร้อนและระยะเวลามีลักษณะซับซ้อน (รูปที่ 1จ) โดยในช่วงอัตราการให้ความร้อนต่ำและระยะเวลานั้นจะให้ %Yield สูงที่สุด ในขณะที่เมื่ออัตราการให้ความร้อนเพิ่มขึ้น ร่วมกับเวลาที่ยาวนานขึ้น จะทำให้ %Yield ลดลงเล็กน้อย แผนที่คอนทัวร์ (รูปที่ 1ฉ) แสดงลักษณะการเปลี่ยนแปลงที่ไม่เป็นเชิงเส้นอย่างชัดเจน โดยมีจุดโค้งเว้าซ้อนกันสะท้อนถึงผลของปฏิสัมพันธ์ระหว่างสองปัจจัยนี้ที่ต้องควบคุมร่วมกันจึงจะสามารถรักษาค่าผลผลิตให้อยู่ในระดับสูงได้



รูปที่ 1 กราฟพื้นผิวตอบสนองและแผนที่คอนทัวร์ของอิทธิพลร่วมกันของตัวแปรต้นต่าง ๆ ที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของไบโอชาร์

การนำแบบจำลองที่สร้างขึ้นไปใช้ในขั้นตอนการหาสภาวะที่เหมาะสมของการไพโรไลซิสด้วยวิธีเชิงตัวเลข โดยอาศัยฟังก์ชันการตอบสนองร่วมกับเกณฑ์ Desirability Function เพื่อค้นหาสภาวะที่ให้ผลผลิตสูงสุดภายใต้ขอบเขตที่กำหนด ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า สภาวะที่เหมาะสมที่สุด ได้แก่ อุณหภูมิ 300.0 °C อัตราการให้ความร้อน 2.0 °C/min และระยะเวลาไพโรไลซิส 2.0 h โดยภายใต้สภาวะดังกล่าว แบบจำลองทำนายว่าจะให้คาร์บอนผลิตไบโอชาร์เท่ากับ 49.2% ซึ่งเป็นค่าสูงสุดในเชิงคณิตศาสตร์ของแบบจำลองภายใต้ข้อจำกัดที่ศึกษา และมีค่า Desirability เท่ากับ 1.000 ซึ่งแสดงถึงความเหมาะสมสูงสุดในเชิงการออกแบบการทดลอง ซึ่งได้ผลิตถ่านไบโอชาร์ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 แสดงผลิตภัณฑ์ไบโอชาร์จากกากข้าวโพดหวานที่ผ่านกระบวนการไพโรไลซิสในสภาวะที่เหมาะสม

เพื่อเป็นการประเมินความน่าเชื่อถือของแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น จึงได้มีการตรวจสอบความแม่นยำของแบบจำลองโดยการสุ่มเลือกสภาวะที่เป็นเลขจำนวนเต็มทั้งหมดจำนวน 10 ชุด ภายในช่วงของตัวแปรต้นที่ใช้ในการออกแบบการทดลอง จากนั้นคำนวณค่าผลได้ของไบโอชาร์จากการทำนาย และนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดลองจริง ดังแสดงในตารางที่ 5 พบว่าค่าผลได้ของไบโอชาร์ที่ทำนายได้มีความใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลองจริง โดยมีค่าความแตกต่างสัมบูรณ์ส่วนใหญ่อยู่ในช่วงไม่เกิน 3% และค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนของทั้ง 10 การทดลองเท่ากับ 1.97% สะท้อนว่าแบบจำลองนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการพยากรณ์ผลผลิตภายใต้สภาวะที่แตกต่างกันได้อย่างมีประสิทธิภาพและน่าเชื่อถือ

ตารางที่ 5 การตรวจสอบความแม่นยำของแบบจำลองโดยเปรียบเทียบระหว่างค่าที่ทำนายได้กับค่าที่ได้จากการทดลองจริง

การทดลอง ที่	ตัวแปรต้น			ผลได้ของไบโอชาร์ (%)		ความแตกต่างสัมบูรณ์ (%)
	X ₁	X ₂	X ₃	จากการทำนาย	จากการทดลองจริง	
1	350	2	4	45.44	46.43	2.18
2	350	5	2	46.3	45.86	0.95
3	650	10	4	29.26	28.96	1.03
4	450	10	2	41.38	41.74	0.86
5	400	20	4	41.26	40.15	2.69
6	600	10	10	29.38	28.72	2.24
7	550	2	4	34.18	35.06	2.59
8	550	15	6	36.28	35.02	3.47
9	550	5	8	32.59	32.32	0.84
10	650	5	6	27.22	26.43	2.89
เฉลี่ย	-	-	-	-	-	1.97

6. สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของการผลิตไบโอชาร์จากกากข้าวโพดหวานด้วยกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า โดยใช้การออกแบบการทดลองแบบ BBD ซึ่งศึกษาผลกระทบของตัวแปรต่าง ๆ ได้แก่ อุณหภูมิ อัตราการให้ความร้อน และระยะเวลาการคงอุณหภูมิในกระบวนการไพโรไลซิสต่อร้อยละผลได้ของไบโอชาร์ ผลการวิเคราะห์พบว่า อุณหภูมิเป็นตัวแปรสำคัญที่สุด โดยมีผลกระทบเชิงลบต่อร้อยละผลได้ของไบโอชาร์ ทั้งในลักษณะเชิงเส้นและกำลังสอง ขณะที่อีกสองปัจจัยมีผลกระทบรองลงมา รวมถึงพบปฏิสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญระหว่างปัจจัยต่าง ๆ ทั้งนี้แบบจำลองพหุนามกำลังสองที่พัฒนาขึ้นมีความเหมาะสมและมีความแม่นยำในการทำนายสูง ($R^2 = 0.9910$) การวิเคราะห์กราฟพื้นผิวและคอนทัวร์ยืนยันปฏิสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับปัจจัยอื่น ซึ่งสภาวะที่เหมาะสมของการผลิตไบโอชาร์จากกากข้าวโพดหวานผ่านกระบวนการไพโรไลซิสคือการใช้อุณหภูมิ 300°C อัตราการให้ความร้อน 2°C/min และเวลาคงอุณหภูมิ 2 h ซึ่งให้ผลผลิตไบโอชาร์สูงสุดที่ 49.2% การตรวจสอบแบบจำลองด้วยข้อมูลสุ่มเพิ่มเติม 10 จุด ให้ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเพียง 1.97% แสดงถึงความแม่นยำและความน่าเชื่อถือของแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น

7. ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากงานวิจัยนี้มีขอบเขตในการศึกษาเฉพาะการหาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมไบโอชาร์จากกากข้าวโพดหวาน และพัฒนาแบบจำลองที่ใช้ในการทำนายผลได้ของไบโอชาร์เท่านั้น เพื่อใช้ในการพิจารณาศักยภาพในการนำของเหลือทิ้งดังกล่าวมาใช้ประโยชน์ ทั้งนี้เพื่อเป็นการต่อยอดจากผลการศึกษานี้ การวิจัยในอนาคตควรพัฒนาแบบจำลองที่มีความซับซ้อนมากขึ้น โดยใช้เทคนิคปัญญาประดิษฐ์ เช่น Random Forest หรือ Neural Network เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการทำนายผลผลิตภายใต้สภาวะที่ซับซ้อนกว่าเดิม โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่ต้องการขยายช่วงตัวแปรหรือรวมตัวแปรใหม่ที่ไม่ได้อยู่ในขอบเขตการศึกษาเดิม นอกจากนี้ควรมีการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมีของผลิตภัณฑ์ไบโอชาร์ที่ได้ เพื่อเป็นการยืนยันและพิจารณาความเหมาะสมของการนำไปประยุกต์ใช้งานต่าง ๆ ได้ อีกทั้งยังควรทำการศึกษาความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของกระบวนการผลิตไบโอชาร์ โดยวิเคราะห์ต้นทุน พลังงานที่ใช้ และผลตอบแทนที่คาดว่าจะได้รับในระดับชุมชนหรือระดับอุตสาหกรรมขนาดย่อม เพื่อสนับสนุนการนำเทคโนโลยีนี้ไปใช้ได้จริง

8. เอกสารอ้างอิง

- กิตติกร สาสุจิตต์, วราพงศ์ แสนพินิจ, ณัฐพงษ์ วงศ์รินทร์, และ ณัฐภูมิ ดุษฎี. (2558). การผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากวัสดุเหลือทิ้งซึ่งและเปลือกข้าวโพดด้วยเทคนิคการอัดรีดขึ้นรูปโดยใช้ตัวประสานแป้งมันผสมปูนขาว. *วารสารมหาวิทยาลัยทักษิณ*. 18(1): 5-14.
- รุ่งทิพา วงศ์ไพศาลฤทธิ และ วิชาญ พงษ์สานต์ศิริ. (2563). ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระของน้ำมันข้าวโพดสามสายพันธุ์. *วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร*. 14(2) : 152-159.
- วิโรจน์ เกษภูาลักษณ์, ณัฐริกา ศรีเกตุ, ปิยะมาส ชูดี, และ สุภาวดี หงษ์ทอง. (2564). ต้นแบบผลิตภัณฑ์ภาชนะสำหรับอาหารแห้งจากเปลือกข้าวโพด. *วารสารวิชาการมหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี*. 11(2) : 11-21.
- Abdul Raheem, A., Ding, L., He, Q., Mangi, F. H., Khand, Z. H., Sajid, M., Ryzhkov, A., & Yu, G. (2022). Effective pretreatment of corn straw biomass using hydrothermal carbonization for co-gasification with coal: Response surface methodology–Box Behnken design. *Fuel*, 324(Part B), 124544.
- Adelawon, B. O., Latinwo, G. K., Eboibi, B. E., Agbede, O. O., & Agarry, S. E. (2021). Comparison of the slow, fast, and flash pyrolysis of recycled maize-cob biomass waste, Box-Behnken process optimization and

- characterization studies for the thermal fast pyrolysis production of bio-energy. *Chemical Engineering Communications*, 209(9), 1246–1276.
- Ahmad, M., Rajapaksha, A. U., Lim, J. E., Zhang, M., Bolan, N., Mohan, D., ... & Ok, Y. S. (2014). Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: A review. *Chemosphere*, 99, 19–33.
- Al Arni, S. (2018). Comparison of slow and fast pyrolysis for converting biomass into fuel. *Renewable Energy*, 124, 197–201.
- Jiao, Y., Chen, H. D., Han, H., & Chang, Y. (2022). Development and utilization of corn processing by-products: A review. *Foods*, 11(22), 3709–3727.
- Lataf, A., Jozefczak, M., Vandecasteele, B., Viaene, J., Schreurs, S., Carleer, R., ... & Vandamme, D. (2022). The effect of pyrolysis temperature and feedstock on biochar agronomic properties. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 168, 105728.
- Lehmann, J., Rillig, M. C., Thies, J., Masiello, C. A., Hockaday, W. C., & Crowley, D. (2016). Benefits of biochar, compost and biochar-compost for soil quality, maize yield and greenhouse gas emissions in a tropical agricultural soil. *Science of The Total Environment*, 543, 295–306.
- Montgomery, D. C. (2017). *Design and analysis of experiments* (9th ed.). Wiley.
- Nguyen, T. Q. N., Nguyen, P. H., Vo, M. T., & Le, V. V. M. (2024). Utilizing sweet corn “milk” residue to develop fiber-rich pasta: Effects of replacement ratio and transglutaminase treatment on pasta quality. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2024(1), 5853459–5853467.
- Nurhayati, I., Kurniawati, C. T., & Kholif, M. A. (2025). Sustainable bioplastics from sweet corn cob waste: Influence of zinc oxide and glycerol on mechanical properties and biodegradability. *Indonesian Journal of Environmental Management and Sustainability*, 9, 1–11.
- Qambrani, N. A., Rahman, M. M., Won, S., Shim, S., & Ra, C. (2017). Biochar properties and eco-friendly applications for climate change mitigation, waste management, and wastewater treatment: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79, 255–273.
- University of Nebraska-Lincoln. (2018). Corn residue removal and CO₂ emissions. *CropWatch*. Retrieved March 22, 2025, from <https://cropwatch.unl.edu/2018/corn-residue-removal-and-co2-emissions/>
- Yadav, S. P. S., Bhandari, S., Bhatta, D., Poudel, A., Bhattarai, S., Yadav, P., ... & Shrestha, R. (2023). Biochar application: A sustainable approach to improve soil health. *Journal of Agriculture and Food Research*, 11, 100498.



ประวัติผู้เขียนบทความ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์นพดล ปั่นจันทร์ ตำแหน่งอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมกระบวนการและอุตสาหกรรม สถาบันวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร 140 ถนนเชื่อมสัมพันธ์ แขวงกระทุ่มราย เขตหนองจอก กรุงเทพมหานคร 10530 โทรศัพท์ 02-588-3655 ต่อ 2328 E-mail: noppadol@mut.ac.th

งานวิจัยที่สนใจ: ไบโอดีเซล เศรษฐกิจหมุนเวียน การจัดการและการใช้ประโยชน์ของเสีย